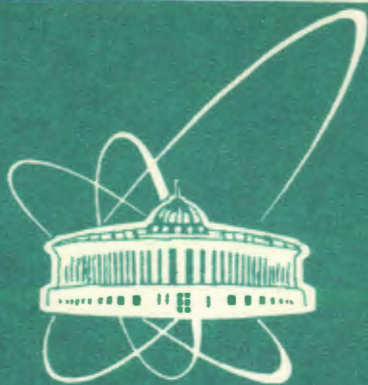


93-367



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-93-367

В.В.Калиниченко

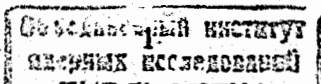
**КОМБИНИРОВАННОЕ УРАВНОВЕШИВАНИЕ
В МАГНИТНЫХ КОМПАРАТОРАХ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

1993

В работах [1,2] рассмотрены магнитные компараторы (МК) постоянного тока с комбинированным уравниванием, дискретное регулирование компенсирующих намагничивающих сил (н.с.), в которых обеспечивается путем изменения числа витков компенсационной обмотки или путем изменения направления тока в секциях компенсационной обмотки. При этом в обоих случаях компенсирующий (эталонный) ток имеет постоянное (фиксированное) значение (обычно порядка 1 А). От количества коммутируемых секций компенсационной обмотки в первую очередь зависят в этом случае дискретность регулирования компенсирующей н.с. и погрешность МК [1,2]. На практике (для получения требуемых значений указанных выше параметров) количество коммутируемых секций компенсационной обмотки МК составляет 6—10. При таком количестве секций компенсационной обмотки мощность потерь в коммутаторе секций в несколько раз превышает мощность потерь собственно в секциях обмотки, если коммутатор выполнен на бесконтактных ключевых элементах (транзисторных или тиристорных ключах). Например, для МК на номинальный ток 1 кА мощность потерь в десяти секциях его компенсационной обмотки составляет ~8 Вт, а в тиристорном коммутаторе с изменением направления тока в секциях — около 20 Вт. Это обстоятельство заставляет обратиться к другим вариантам реализации комбинированного уравнивания в МК, предназначенных для измерения постоянных токов большой силы.

Очевидно, что регулирование компенсирующей н.с. в МК с комбинированным уравниванием может осуществляться путем регулирования (плавного или дискретного) величины компенсирующего тока при фиксированном числе витков в компенсационной обмотке. Упрощенная блок-схема этого варианта МК представлена на рис.1. В принципе возможно также сочетание регулирования величины компенсирующего тока с изменением числа витков компенсационной обмотки (эта разновидность МК в данной работе рассматриваться не будет).

МК по рис.1 содержит преобразователь разбаланса намагничивающих сил 1, с которым магнитно связаны измерительная обмотка W , компенсационная обмотка W_k и обмотка обратной связи W_c . Кроме того, МК содержит регулируемый источник постоянного тока 2 высокой точности, усилитель постоянного тока 3 и эталонный резистор R . В качестве преобразователя неравновесия н.с. 1 может быть использован, например, магнитный модуля-



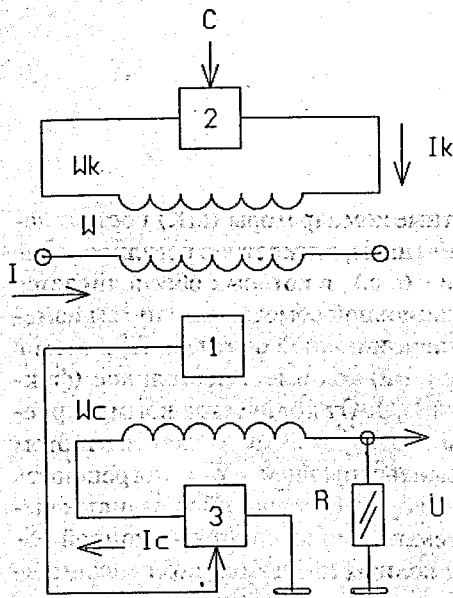


Рис. 1. Упрощенная блок-схема магнитного компаратора постоянного тока с комбинированным уравновешиванием, содержащего регулируемый источник постоянного тока высокой частоты

тор, действующий по принципу удвоения частоты. Регулируемый источник постоянного тока 2 имеет вход управления С, на который поступают соответствующие сигналы от блока установки величины компенсирующего тока (на блок-схеме не показан). Код установки поступает в блок установки либо от внешнего управляющего устройства, либо от специального блока МК, в котором осуществляется соответствующее преобразование выходного напряжения U (на блок-схеме не показан).

Заметим, что, как и в других подобных устройствах, например [1], преобразователь неравновесия н.с., УПТ и обмотка обратной связи W_c входят в замкнутую систему автоматического регулирования, действие которой направлено на устранение разбаланса н.с. (указанные н.с. создаются постоянными токами, протекающими в обмотках W , W_k и W_c). В стационарном режиме состояние системы авторегулирования описывается соотношением

$$IW - I_k W_k \pm I_c W_c = \Delta I W_e, \quad (1)$$

где W , W_k и W_c — число витков соответственно в обмотках измерительной, компенсационной и обратной связи, I — величина измеряемого тока, I_k — величина компенсирующего тока, I_c — величина тока в обмотке обратной связи, $\Delta I W_e$ — величина действующего рассогласования.

При большом усилении в контуре авторегулирования величиной действующего рассогласования $\Delta I W_e$ можно пренебречь ввиду ее малости, тогда из соотношения (1) получаем

$$I = K_1 I_k \pm K_2 I_c, \quad (2)$$

где $K_1 = W_k/W$, $K_2 = W_c/W$. Таким образом, определение величины измеряемого тока I основывается на знании величин токов I_k и I_c . Предполагается, что в МК по схеме рис.1 используется регулируемый источник постоянного тока 2 высокой точности, обеспечивающий установку любого значения I_k в пределах рабочего диапазона с необходимой точностью. Определение I_c в МК обычно производится путем измерения падения напряжения U на эталонном резисторе. С учетом этого

$$I = K_1 I_k \pm K_2 U, \quad (3)$$

где $K_2 = W_c/WR$, R — номинальная величина сопротивления эталонного резистора.

Предельное значение относительной погрешности δ измерения тока с помощью обсуждаемого МК может быть найдено из соотношения

$$\delta = \delta_I (1 - I_c W_c / I_k W_k)^{-1} + (\delta_U + \delta_R) (I_k W_k / I_c W_c - 1)^{-1} + \delta_D + \delta_e, \quad (4)$$

где δ_I — относительная погрешность установки (измерения) текущего значения тока I_k , δ_U — относительная погрешность измерения выходного напряжения, δ_R — относительная погрешность определения сопротивления эталонного резистора, δ_D и δ_e — составляющие относительной погрешности МК, обусловленные дрейфом нуля преобразователя неравновесия н.с. и действующим рассогласованием в контуре авторегулирования МК, $\delta_D = \Delta I W_D / I W$, $\delta_e = \Delta I W_e / I W$, $\Delta I W_D$ — величина дрейфа нуля преобразователя неравновесия н.с., приведенная к его входу (в аналогичном соотношении, приведенном в работе [2], составляющие δ_D и δ_e погрешности МК не учитывались). В режимах работы, для которых

$$I_k W_k \gg I_c W_c, \quad (5)$$

$$\delta = \delta_I + (\delta_U + \delta_R) I_c W_c / I_k W_k + \delta_D + \delta_e. \quad (6)$$

Из соотношений (4) — (6) следует, что относительная погрешность δ измерения тока I определяется в основном относительной погрешностью δ_I установки (измерения) значения компенсирующего тока I_k (если составляющие δ_D и δ_e пренебрежимо малы). Влияние погрешностей δ_U и δ_R существенно ослабляется и при соблюдении условия (5) становится пренебрежимо малым.

Не обсуждая здесь подробно достоинства и недостатки рассматриваемого (рис.1) варианта МК с комбинированным уравниванием отметим, что для практического использования такого варианта МК, как следует из соотношений (3) — (6), необходимо иметь прецизионные средства для генерирования и измерения постоянного тока I_k , регулируемого (непрерывно или дискретно) в диапазоне от 0 до $I_{k\text{ ном}}$. Создание подобных средств является непростой задачей, если учесть, что при умеренном числе витков компенсационной обмотки W_k (порядка 2000+5000 витков) для МК больших токов (на несколько единиц или десятков кА) значение $I_{k\text{ ном}}$ будет составлять от единиц до нескольких десятков ампер.

На рис.2 представлена упрощенная блок-схема регулируемого стабилизатора постоянного тока, предлагаемого для использования в обсуждаемом МК в качестве регулируемого источника компенсирующего тока I_k . Стабилизатор содержит преобразователь неравновесия н.с. 4, с которым магнитно связаны выходная обмотка W_0 и секции $W_1, W_2 \dots W_n$ входной обмотки, усилитель постоянного тока 5, источник опорного тока 6, коммутатор 7 сек-

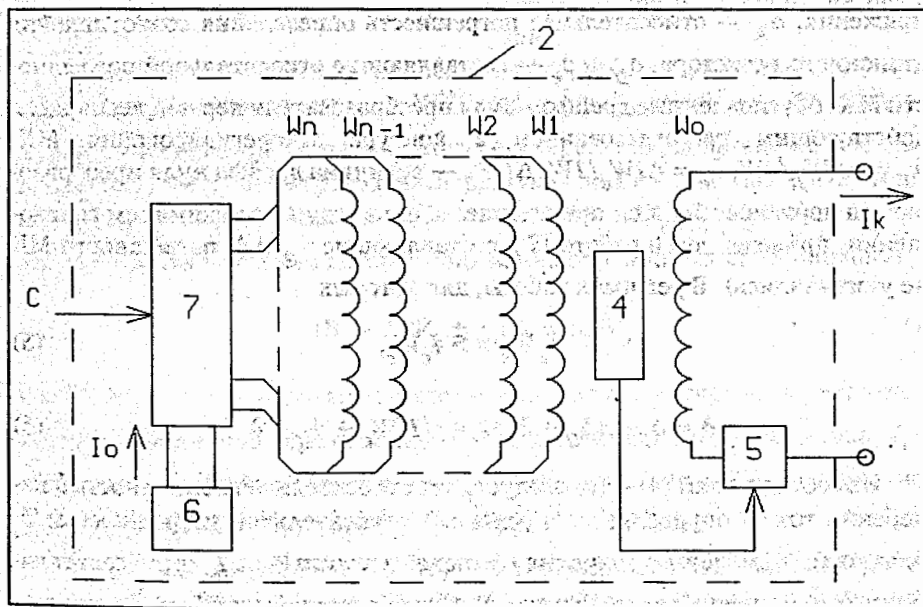


Рис. 2. Упрощенная блок-схема регулируемого стабилизатора постоянного тока высокой точности

ций входной обмотки. Входная обмотка выполнена в виде n отдельных изолированных секций с разным числом витков, которые подключены к соответствующим выходам коммутатора 7. На вход коммутатора 7 поступает опорный ток I_0 от источника опорного тока 6. Коммутатор 7 обеспечивает включение секций входной обмотки в различных сочетаниях в цепь опорного тока I_0 . Опорный ток имеет строго фиксированное значение. Точность определения номинального значения опорного тока (с учетом нестабильности в условиях эксплуатации) должна быть адекватна требуемой точности МК рассматриваемого типа (рис.1).

Измерительная часть регулируемого стабилизатора тока представляет собой магнитный компаратор, в котором производится магнитное сравнение н.с., создаваемых опорным током I_0 и стабилизируемым током I_k (выходным током стабилизатора). Стабилизатор является замкнутой системой автоматического регулирования следящего типа. Действие замкнутой системы авторегулирования направлено на поддержание баланса н.с., действующих на преобразователь разбаланса н.с.4. Опорный ток I_0 , протекая по включенным секциям входной обмотки, создает н.с. $I_0 W_i$ (здесь W_i — суммарное число витков включенных секций). Под действием н.с. на выходе преобразователя неравновесия н.с.4 появляется напряжение, которое поступает на вход УПТ 5 и вызывает соответственно появление на его выходе тока I_k . Ток I_k , протекая по выходной обмотке с числом витков W_0 , создает н.с. $I_k W_0$, направленную навстречу н.с. $I_0 W_i$. Состояние баланса МК стабилизатора можно представить в виде

$$I_0 W_i - I_k W_0 = \Delta I W_{es},$$

откуда

$$I_k = I_0 W_i / W_0 + \Delta I W_{es} / W_0, \quad (7)$$

где под I_0 подразумевается номинальное значение опорного тока, а $\Delta I W_{es}$ — величина действующего рассогласования в контуре авторегулирования.

Погрешности стабилизатора тока по рис.2 обусловлены главным образом нестабильностью опорного тока, дрейфом нуля преобразователя неравновесия н.с. и величиной действующего рассогласования в контуре авторегулирования. Предельное значение относительной погрешности δ_I стабилизатора тока с учетом указанных выше источников погрешности можно представить в виде

$$\delta_I = \delta_0 + \delta_{Ds} + \delta_{es}, \quad (8)$$

где δ_o — относительная погрешность источника опорного тока, δ_{Ds} и δ_{es} — составляющие относительной погрешности стабилизатора тока I_k , обусловленные соответственно дрейфом нуля преобразователя неравновесия н.с. и действующим рассогласованием в контуре авторегулирования стабилизатора, $\delta_{Ds} = \Delta I W_{Ds} / I_o W_i$, $\delta_{es} = \Delta I W_{es} / I_o W_i$, $\Delta I W_{Ds}$ — величина дрейфа нуля преобразователя неравновесия н.с. 5, приведенная к его входу. Предельное значение относительной погрешности МК, выполненного по схеме рис.1, источник компенсирующего тока которого выполнен по схеме рис.2, можно найти из соотношения (6) с учетом соотношений (7) и (8):

$$\delta = \delta_o + \delta_{Ds} + \delta_{es} + (\delta_U + \delta_R) I_c W_c W_o / I_o W_i W_k + \delta_D + \delta_e. \quad (9)$$

Если диапазон изменения $|I_c W_c|$ ограничен величиной шага дискретного регулирования компенсирующей н.с. $I_k W_k$, то есть $|I_c W_c| \leq |I_o W_s W_k / W_o|$, соотношение (9) упрощается и становится удобным для использования:

$$\delta = \delta_o + \delta_{Ds} + \delta_{es} + (\delta_U + \delta_R) W_s / W_i + \delta_D + \delta_e, \quad (10)$$

где W_s — дискретность регулирования числа витков входной обмотки с помощью коммутатора 7.

Соотношения (7) — (10) получены в предположении, что коммутатор 7 выполнен на идеальных ключах (не имеющих токов утечки в запертом (разомкнутом) состоянии). При использовании в коммутаторе 7 бесконтактных ключей за счет их токов утечки в МК появляется дополнительный источник погрешности, не учтенный в соотношениях (9) и (10). Таким образом, реализация МК с источником тока по схеме рис.2 включает разработку высокостабильного нерегулируемого источника опорного тока и коммутатора с малыми токами утечки ключей. В какой-то мере можно считать, что это дополнительные проблемы, которых лучше не иметь.

В настоящей работе предлагается новый вариант МК с комбинированным уравниванием, упрощенная блок-схема которого представлена на рис.3. Для реализации этого МК требуется ограниченное число прецизионных резисторов, а остальные электронные узлы выполняются на элементной базе широкого применения. Предложенный МК содержит первый преобразователь разбаланса н.с. 1, с которым магнитно связаны измерительная обмотка W , компенсационная обмотка W_k и обмотка обратной связи W_c , управляемый стабилизированный источник постоянного тока 2, первый усилитель постоянного тока 3 (УПТ 3), второй преобразователь неравновесия н.с.4, с которым магнитно связаны входная W_i и выходная W_o обмотки,

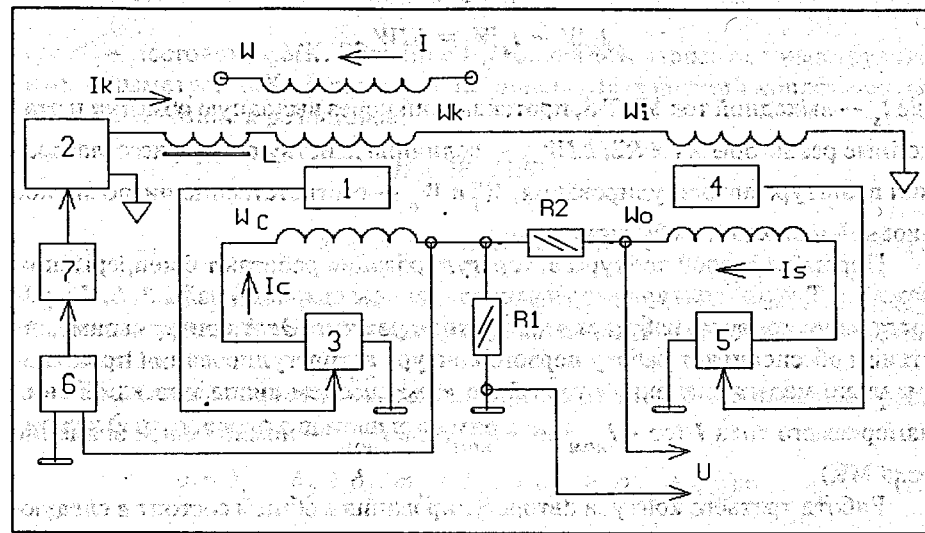


Рис. 3. Упрощенная блок-схема нового варианта магнитного компаратора постоянного тока с комбинированным уравниванием

второй усилитель постоянного тока 5 (УПТ 5), фильтр нижних частот 6, пороговое устройство 7, дроссель L , первый $R1$ и второй $R2$ эталонные резисторы.

Рассматриваемый МК содержит три замкнутых системы (контур) автоматического регулирования. Первый контур авторегулирования содержит узлы 1, 3, W , W_k , W_c и $R1$. В стационарном режиме состояние первого контура авторегулирования описывается соотношением

$$IW = I_k W_k \pm I_c W_c = \Delta I W_{e1},$$

где I — измеряемый ток, подводимый к измерительной обмотке, I_k — ток, вырабатываемый стабилизатором тока 2 и протекающий через компенсационную W_k и входную W_i обмотки, I_c — выходной ток УПТ 3, протекающий через обмотку обратной связи W_c и первый эталонный резистор $R1$, $\Delta I W_{e1}$ — величина действующего рассогласования в контуре авторегулирования, W , W_k и W_c — число витков соответственно измерительной, компенсационной и обмотки обратной связи.

Второй контур авторегулирования содержит узлы 4, 5, W_i , W_o , $R1$ и $R2$. В стационарном режиме его состояние описывается соотношением

$$I_{\kappa} W_i - I_s W_o = \Delta I W_{e2},$$

где I_s — выходной ток УПТ 5, протекающий через выходную обмотку и эталонные резисторы $R1$ и $R2$, $\Delta I W_{e2}$ — величина действующего рассогласования в контуре авторегулирования, W_i и W_o — соответственно число витков входной и выходной обмоток.

Первый и второй контуры авторегулирования работают в непрерывном режиме. Третий контур авторегулирования, содержащий узлы 2, 6, 7 и узлы первого контура, работает в дискретном режиме. Этот контур своим действием обеспечивает работу первого контура авторегулирования при относительно малых значениях тока I_c во всем рабочем диапазоне изменения измеряемого тока I (от $-I_{ном}$ до $+I_{ном}$, где $I_{ном}$ — номинальное значение тока МК).

Работа третьего контура авторегулирования в общем состоит в следующем. Пусть к моменту начала рассмотрения работы измеряемый ток имел неизменяющуюся величину I_1 , соответственно этому его значению в третьем контуре установилось значение тока $I_{\kappa 1} = const$. Первый контур авторегулирования работает в режиме слежения (нормальный режим его работы), при этом постоянная составляющая I_c выходного тока УПТ 3 может иметь какое-либо значение в диапазоне от $-I_{см}$ до $+I_{см}$, где $I_{см}$ — установленное предельное значение этого тока. Пусть теперь измеряемый ток изменяется и достигает такой величины I_2 , при которой постоянная составляющая выходного тока УПТ 3 выйдет за установленные допустимые границы ($|I_c| > |I_{см}|$). Соответственно, поступающее на вход порогового устройства 7 через фильтр нижних частот постоянное напряжение, (снимаемое с $R1$) выйдет за пределы одного из установленных уровней. Это приводит к появлению на выходах порогового устройства 7 сигналов, под действием которых выходной ток стабилизатора тока 2 будет изменяться (уменьшаться или увеличиваться) до тех пор, пока не достигнет значения $I_{\kappa 2}$, при котором $|I_c| < |I_{см}|$. Это значение тока зафиксируется в стабилизаторе тока 2 и МК будет работать при $I_{\kappa 2} = const$ до очередного изменения величины измеряемого тока, при котором $|I_c| > |I_{см}|$, что снова вызовет дискретное срабатывание третьего контура авторегулирования.

В целом, в МК по схеме рис.3 осуществляется преобразование измеряемого тока большой силы в напряжение U , которое является выходным напряжением МК. Связь между измеряемым током I и выходным напряжением U устанавливается соотношением

$$I = KU,$$

где K — постоянная МК. Значение постоянной МК зависит от конструктивных параметров МК, а также от номинальных значений сопротивлений $R1$ и $R2$ эталонных резисторов:

$$K = W_c / WR1,$$

$$K = W_o W_{\kappa} / W_i W (R1 + R2). \quad (11)$$

При этом выбор конструктивных параметров устройства должен быть осуществлен таким образом, чтобы одновременно были выполнены оба соотношения (11).

Предельное значение относительной погрешности МК по схеме рис.3 может быть оценено с помощью соотношения

$$\delta = \delta_U + \delta_2 + \delta_1 / m_1 + \delta_{\Delta 1} + \delta_{e1} + (\delta_{\Delta 2} + \delta_{e2}) m_2, \quad (12)$$

где δ_U — относительная погрешность измерения выходного напряжения U , δ_1 и δ_2 — соответственно относительные погрешности определения сопротивлений первого и второго эталонных резисторов $R1$ и $R2$, δ_{e1} и δ_{e2} — составляющие относительной погрешности МК, обусловленные действующими рассогласованиями соответственно в первом и втором контурах авторегулирования, $\delta_{e1} = \Delta I W_{e1} / I W$, $\delta_{e2} = \Delta I W_{e2} / I W$, $\delta_{\Delta 1}$ и $\delta_{\Delta 2}$ — составляющие относительной погрешности МК, обусловленные дрейфами нулей соответственно первого 1 и второго 4 преобразователей неравновесия н.с., $\delta_{\Delta 1} = \Delta I W_{\Delta 1} / I W$, $\delta_{\Delta 2} = \Delta I W_{\Delta 2} / I W$, $\Delta I W_{\Delta 1}$ и $\Delta I W_{\Delta 2}$ — соответственно величины дрейфа нулей преобразователей 1 и 4, приведенные к их входам, $m_1 = I W W_i R2 / I_c W_{\kappa} W_o R1$, $m_2 = W_{\kappa} / W_i$.

В новом варианте МК с комбинированным уравниванием (рис.3) преобразователь неравновесия н.с. 1 выполняется на основе магнитного модулятора, действующего по принципу удвоения частоты. Магнитомодуляционный узел этого модулятора содержит рабочие магнитопроводы и массивный магнитный экран [1,2], через который обмотки W , W_{κ} и W_c трансформаторно связаны друг с другом (сказанное в полной мере относится и к преобразователю 4: здесь трансформаторно связаны обмотки W_i и W_o). Переменная составляющая измеряемого тока I при определенных условиях (при относительно небольшом суммарном активном сопротивлении R_{Σ} в цепи обмотки обратной связи и относительно большой индуктивности дросселя L ; здесь $R_{\Sigma} = R1 + R_c + R_{вых}$, где R_c — активное сопротивление об-

мотки обратной связи W_c , $R_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление УПТ 3) практически без искажений передается в цепь обмотки W_c , благодаря чему МК имеет широкую полосу пропускания.

Технические решения, представленные блок-схемой рис.1 и 2, были созданы в процессе разработки системы питания магнитных элементов циклотрона У-120К (технический проект циклотрона У-120К был разработан в ЛЯП ОИАИ для Республики Куба в 1989г.). Техническое решение, представленное блок-схемой рис.3, было разработано в 1993 г. по программе "Фундаментальная метрология". Исследования по этой программе ведутся в ОИАИ при поддержке Министерства науки и технической политики Российской Федерации.

Литература:

1. Калиниченко В.В. — Сообщение ОИАИ Р13-93-166, Дубна, 1993.
2. Калиниченко В.В. — Сообщение ОИАИ Р13-93-177, Дубна, 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 октября 1993 года.